

# ОТКРЫТЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЗАДАЧИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Е. А. Кучерявый<sup>1</sup>, Д. А. Молчанов<sup>2</sup>, В. И. Петров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИУ ВШЭ, Москва, 101000, Российская Федерация

<sup>2</sup> РУДН, Москва, 117198, Российская Федерация

<sup>3</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: kirichek@sut.ru

## Аннотация

Терагерцовый диапазон частот является привлекательным ресурсом для построения высокоскоростных беспроводных сетей связи. При работе в терагерцовом диапазоне частот, полоса пропускания шириной в несколько сотен гигагерц обеспечивает высокую емкость сети связи, в то время как высокая несущая частота позволяет существенно уменьшить размер приемопередающего оборудования. Последнее, в свою очередь, ведет к возможности создавать более компактные устройства связи и экономнее расходовать заряд батареи. В то же время, использование терагерцового диапазона частот вносит определенные сложности в работу сетей связи, в частности, связанные с необходимостью учитывать быстрое ослабление терагерцового сигнала при распространении в среде, эффект молекулярной абсорбции, а также эффект от использования направленных антенн.

## Ключевые слова

терагерцовый диапазон частот, беспроводные сети, направленные антенны, молекулярная абсорбция.

## Информация о статье

УДК 004.725.5, 621.396

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 15.12.16, принята к печати 28.02.17.

**Ссылка для цитирования:** Кучерявый Е. А., Молчанов Д. А., Петров В. И. Открытые исследовательские задачи и возможные приложения для сетей связи терагерцового диапазона частот // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 1. С. 54–67.

# OPEN RESEARCH PROBLEMS AND POSSIBLE APPLICATIONS FOR TERAHERTZ BAND WIRELESS NETWORKS

Y. Koucheryavy<sup>1</sup>, D. Moltchanov<sup>2</sup>, V. Petrov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> NRU HSE, Moscow, 101000, Russian Federation

<sup>2</sup> RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation

<sup>3</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: kirichek@sut.ru

**Abstract**—Terahertz band frequencies is an attractive resource to be utilized in next-generation high-rate wireless networks. Terahertz band brings such unique advantages as several hundreds of gigahertz channel bandwidth, leading to extreme capacity of the wireless network, and high central frequency, enabling design of miniature and energy-efficient transceivers. At the same time, exploring of terahertz frequency band leads to several problems and challenges to be taken into account, including but not limited to: i) short communication range of terahertz equipment, ii) effect of molecular absorption, and iii) the consequences of directional antennas utilization.

**Keywords**—Terahertz band, wireless networks, directional antennas, molecular absorption.

## Article info

Article in Russian.

Received 15.12.16, accepted 28.02.17.

**For citation:** Koucheryavy Y., Moltchanov D., Petrov V.: Open research problems and possible applications for terahertz band wireless networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 1. pp. 54–67 (in Russian).

## Введение

Постоянный рост требуемой скорости передачи данных в беспроводных сетях связи ведет к последовательному увеличению объема частотно-пространственного ресурса, выделенного на каждого пользователя. С учетом того факта, что, начиная с некоторого значения, дальнейшее увеличение плотности размещения точек доступа и базовых станций не ведет к дальнейшему увеличению емкости сети [1], обозначенный тренд влечет за собой увеличение ширины полосы пропускания канала, выделенного на конкретного абонента, а следовательно, и общей ширины полосы пропускания системы связи.

Прослеживая эволюцию сетей связи на примере технологии семейства IEEE 802.11 Wi-Fi можно отметить непрерывный рост ширины полосы пропускания с 22 МГц в 1997 г. (стандарт IEEE 802.11-1997) до 2.16 ГГц в 2016 г. (стандарт IEEE 802.11ad). То есть, ширина полосы пропускания канала выросла примерно в 100 раз менее чем за 20 лет. Наиболее современная версия стандарта Wi-Fi, находящаяся в данный момент в разработке, IEEE 802.11ay предполагает увеличение ширины полосы пропускания канала до 8 ГГц.

В то же время, при дальнейшем увеличении ширины полосы пропускания канала связи, возникают существенные трудности. В первую очередь, это связано с тем, что текущие карты частотного регулирования не имеют каналов,

шириной более 10 ГГц вокруг несущих ниже 250 ГГц. Первый блок достаточного размера (примерно 50 ГГц) располагается в диапазоне 275–325 ГГц и уже попадает в область терагерцовых частот со своими специфическими особенностями<sup>1</sup>.

Терагерцовый диапазон частот (0,3–3 ТГц) является, в некотором роде, уникальным. В то время как частоты как ниже, так и выше интересующего нас спектра (такие как сантиметровые/миллиметровые, с одной стороны, и инфракрасные, с другой) детально изучены, терагерцовый диапазон остается едва ли не единственным «белым пятном» на карте частот [2]. Одной из основных сложностей в освоении терагерцового диапазона частот является трудность в построении генератора сигнала достаточной мощности. Дело в том, что данный спектр находится аккуратно посередине между частотным диапазоном, где для генерации сигнала преимущественно используются осцилляторы, и частотным диапазоном, где преимущественно используют генераторы фотонов. В связи с этим, требуется включать в генератор терагерцового сигнала элементы, повышающие/понижающие частоту, что ведет к снижению эффективности установки и общему удорожанию системы. Второй важной особенностью терагерцового диапазона частот является существенный вклад молекулярной абсорбции в распространении терагерцового сигнала [3, 4]. Наличие данного эффекта требует аккуратного выбора частотных каналов для связи в терагерцовом диапазоне частот, а также, пусть и не всегда значительно, увеличивает общее ослабление терагерцового сигнала при распространении в среде.

В то же время, огромный объем доступного частотного ресурса (теоретически, до нескольких терагерц, что, как минимум, на три десятичных порядка выше, чем у существующих систем связи сантиметрового диапазона) ведет к теоретической емкости сети в несколько терабит в секунду, что намного превышает значения, достижимые на более низких частотах. Одновременно с этим, в отличие от беспроводных сетей связи, работающих в видимом спектре, терагерцовые сети позволяют передавать данные даже в ситуациях, когда отсутствует прямая видимость между приемником и передатчиком [5, 6].

В итоге, беспроводные сети связи в терагерцовом диапазоне частот как обладают набором неоспоримых достоинств, так и привносят новые исследовательские задачи. Не ставя цель охватить весь спектр вопросов, связанных с достоинствами и проблемами терагерцовых сетей связи, в данной работе приводится описание основных перспективных приложений и наиболее явно выделяющихся исследовательских задач. Таким образом, представленная работа объединяет предыдущие изыскания в различных областях знаний, что должно упростить входение в столь многогранную область, как построение и анализ терагерцовых сетей связи.

Статья структурирована следующим образом. В Разделе I описаны и классифицированы возможные приложения беспроводных сетей связи терагерцового диапазона частот. В Разделе II приведены некоторые исследовательские задачи, требующие решения, а также описаны причины их возникновения. Основные выводы по статье и основные итоги проведенного исследования приведены в Заключение.

---

<sup>1</sup> United States Frequency Allocation Chart. URL: [https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/january\\_2016\\_spectrum\\_wall\\_chart.pdf](https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/january_2016_spectrum_wall_chart.pdf)

## I Перспективные приложения для терагерцовых сетей связи

Появление терагерцовых сетей связи делает возможным сразу несколько групп ресурсоемких приложений. Некоторые из них представляют собой логическое развитие распространенных приложений, с учетом особенностей терагерцовых сетей связи. Другие же, напротив, стали принципиально возможными только с появлением беспроводных сетей связи в терагерцовом диапазоне частот [4]. В разделе приведены основные приложения из обеих категории, а также предлагаемые сценарии использования для терагерцовых сетей связи (рис. 1).

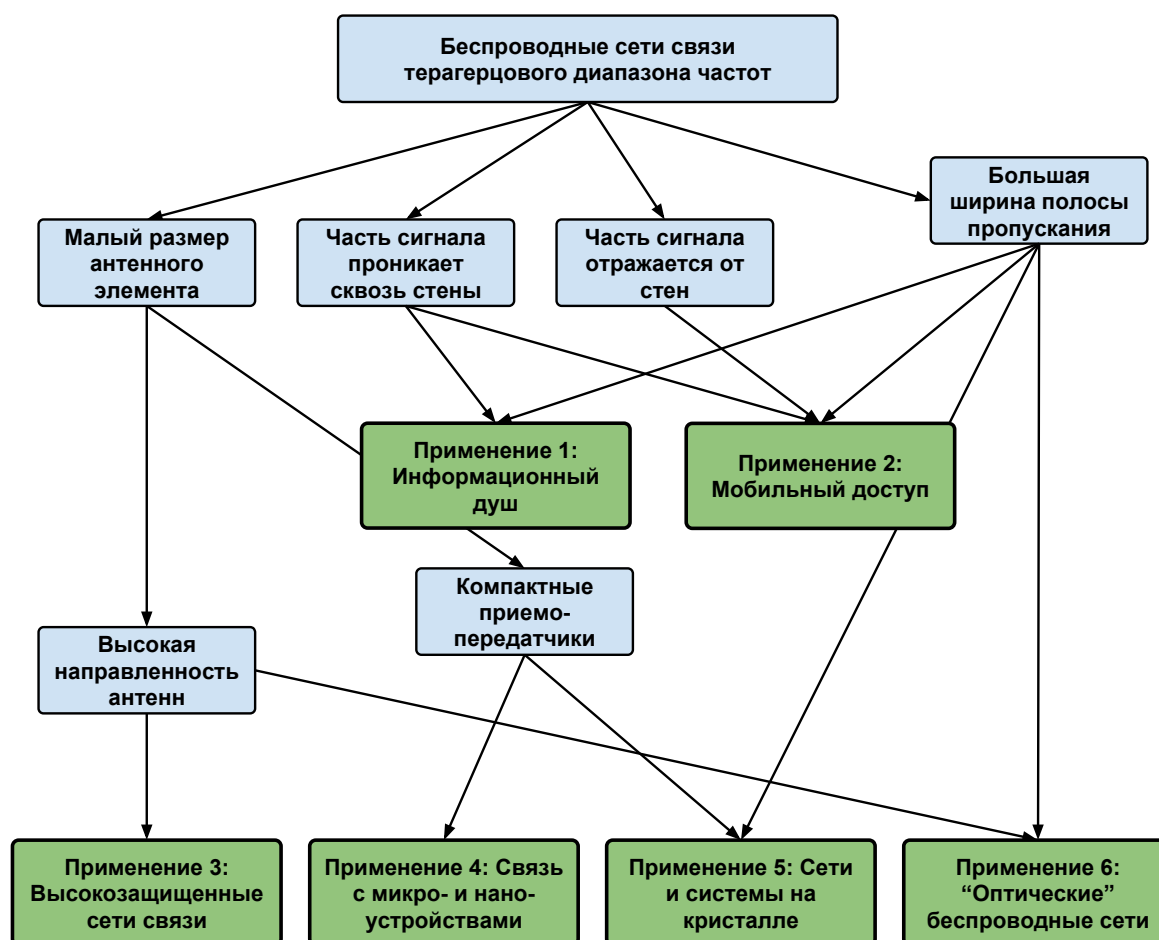


Рис. 1. Достоинства и возможные приложения для сетей связи терагерцового диапазона частот

### 1 Информационный душ

Малый радиус покрытия терагерцовых сетей связи, вызванный быстрым затуханием терагерцового сигнала с расстоянием при распространении в среде, требует пересмотра концепции «малых сот». С одной стороны, использование терагерцового диапазона частот для малых сот представляется выгодным в силу высокой потенциальной емкости образуемой сети. С другой, реалистичный радиус терагерцовой соты при использовании существующего оборудования ограничен несколькими метрами. Следовательно, полное покрытие даже ограниченной территории терагерцовыми сотами является экономически нецелесо-

образным, в виду большого числа требуемых точек доступа и высокой стоимости отдельной точки доступа.

В связи с описанным ограничением, была предложена концепция «информационного душа», основной идеей которой является размещение небольшого числа терагерцовых точек доступа в областях с наиболее интенсивным потоком пользователей: входные двери в торговый комплекс, вход на и выход с эскалатора метрополитена, узкий коридор с высокой проходимостью и т. д. Таким образом, несмотря на то, что полного покрытия заданной зоны (например, вестибюля метрополитена) не достигается, существенная часть потока людей периодически оказывается в зоне покрытия той или иной терагерцовой точки доступа. Наши предыдущие изыскания показывают, что среднее время между попаданием в зону покрытия хотя бы одной терагерцовой точки доступа при реалистичных допущениях о мобильности пользователя и размерах помещения варьируется от нескольких секунд до нескольких минут [7]. Описанное наблюдение лежит в основе концепции «информационного душа» – точки доступа большой емкости, которая за короткий промежуток времени, что пользователь находится в зоне покрытия (ориентировочно, несколько секунд) организует передачу большого массива данных из с/на пользовательский терминал. Постоянная переадресация «тяжелого» кэшируемого трафика (например, видео) на терагерцовые точки доступа позволяет существенно «разгрузить» сотовую сеть и освободить ресурсы для тех абонентов, которые в данный момент не находятся в зоне покрытия ни одной из терагерцовых точек доступа.

## **2 Мобильный доступ**

Применимость терагерцового диапазона частот для имеющихся беспроводных локальных и сотовых сетей ограничена, в силу малого радиуса покрытия отдельной терагерцовой точки доступа. Данное ограничение может быть частично снято посредством размена емкости сети на дальность связи при понижении частоты до нижней части терагерцового спектра (в районе 0,3 ТГц), а также уменьшении ширины полосы пропускания канала с сотен до десятков гигагерц.

В результате, появляется возможность создавать и поддерживать надежные терагерцовые соединения на дальностях до нескольких десятков метров, что уже сопоставимо с практическим радиусом покрытия современных сетей семейства IEEE 802.11 Wi-Fi или малых сот, построенных на технологии LTE.

Построение терагерцовых сотовых сетей большой емкости является одним из наиболее перспективных, но, в то же время, одним из наиболее сложных приложений, поскольку требует решения множества исследовательских задач, описанных в следующем разделе [8, 9].

## **3 Высокостащенные сети связи**

Возможность создавать диаграммы с высокой направленностью в комбинации с высокой емкостью терагерцовых сетей связи позволяет использовать данные системы для организации высокостащенных соединений. Типовой сценарий предполагает построение диаграммы направленности с очень узким лучом между, например, банкоматом и пользовательским устройством, например, мобильным телефоном, находящимися в прямой видимости друг от друга. В ре-

зультате, получается система, прослушать которую и, тем более, вмешаться в работу которой может только терминал, находящийся на отрезке банкомат-телефон. Однако данный отрезок достаточно короткий и, что не менее важно, полностью визуально просматривается как пользователем, так и камерой банкомата в подавляющем большинстве сценариев. Более того, можно показать, что использование соответствующих кодов делает взлом подобной линии связи практически невозможным, а саму систему «теоретически стойкой». Последнее означает, что вероятность успешно дешифровать передаваемое сообщение не больше вероятности угадать передаваемое сообщение, случайно перебирая нули и единицы с помощью генератора случайных чисел.

#### **4 Связь с микро- и нано-устройствами**

Возможность создавать миниатюрные приемопередатчики, работающие на терагерцовых частотах, является одним из необходимых условий для построения сетей связи между микро- и нано-объектами. Данные устройства, иногда называемые «нанороботами», должны работать на основе примитивной логики и выполнять только тривиальные задачи. В то же время, при должной координации между устройствами, образованная «наносеть» может выполнять полезные и в рамках макромира задачи, например, поиск и уничтожение раковых клеток в организме человека. В отличие от макроскопических терагерцовых приемопередатчиков, для которых предполагается создание антенных массивов из тысяч и даже миллионов элементов [10], микроскопические приемопередатчики предполагается оснащать максимально упрощенной логикой работы, а также всего несколькими антеннами со небольшой направленностью. Если убрать из рассмотрения некоторые делала, то данная группа приложений является логическим развитием концепции сенсорных сетей на микроуровне.

#### **5 Сети и системы на кристалле**

В связи с имеющимися ограничениями на дальнейший рост частоты вычислительных элементов компьютера (в первую очередь, процессоров), дальнейший рост вычислительной мощности предполагается, в первую очередь, за счет параллелизации выполняемых задач и одновременном исполнении десятков и сотен потоков на многоядерных системах. Однако, организация эффективного одновременного исполнения разнородных задач с различной вычислительной сложностью, частично связанных друг с другом требует создания эффективного и надежного механизма обмена информацией (данными и управляющими командами) между вычислительными элементами (ядрами) процессора.

В то же время, масштабируемость существующих проводных систем организации совместного доступа к разделяемым данным и синхронизации между ядрами процессора невысока и позволяет эффективно работать только системе с не более чем несколькими десятками ядер. В этих условиях, применение сети, построенной по беспроводным принципам (даже если вместо воздуха средой распространения будет волновод), позволяет существенно повысить масштабируемость все системы. В частности, было показано, что трафик между элементами процессора во многих случаях является стохастическим, а значит должен эффективно мультиплексироваться при работе с разделяемым «беспроводным» каналом связи [11]. Развивая предыдущее исследование, в работе [12] было

показано, что использование терагерцового канала связи позволяет поддерживать одновременно до нескольких сотен потоков данных между ядрами и кэш-памятью современного процессора, даже без внесения существенных изменений в его архитектуру. Развивая предложенную идею на один уровень выше, в нескольких работах был предложен подход, позволяющий организовать высокочастотную беспроводную связь не только между ядрами процессора, но и между отдельными компонентами компьютера, например, процессором и видеокартой [13].

## **6 «Оптические» беспроводные сети**

В заключении данного раздела стоит упомянуть о еще одном немаловажном тренде в построении беспроводных сетей связи следующего поколения.

Дальнейшее увеличение плотности малых сот и точек доступа ведет к необходимости уделять существенное внимание каналу связи между точкой доступа и сетью Интернет. Во многих случаях, использование проводного соединения для организации подобного канала связи нецелесообразно по экономическим причинам. В этих условиях, беспроводное соединение, работающее в терагерцовом диапазоне частот, может служить подходящей альтернативой.

В данной группе приложений предлагается построение сети связи следующего поколения с использованием большого числа малых сот, работающих на частотах в несколько десятков гигагерц. Подобные точки доступа могут быть размещены практически где угодно: в коридорах и помещениях, снаружи на углах зданий, фонарных столах и других объектах. Одновременно предполагается, что канал связи между малой сотой и ядром сети будет организован с помощью системы связи, работающей в терагерцовом диапазоне частот. Для этого предлагается использование антенных массивов, формирующих диаграмму с высокой направленностью на обоих концах соединения, а также точное взаимное позиционирование приемопередатчиков для достижения наилучшего качества сигнала между ними.

Основная мотивировка для данной группы приложений заключается в том, что для обеспечения корректной работы точки доступа, обслуживающей несколько десятков сессий, в каждой из которых может передаваться до нескольких гигабит в секунду требует существенно большей емкости на линии связи точка доступа – Интернет. Подобные скорости на современном оборудовании могут быть обеспечены либо использованием беспроводных соединений, работающих в терагерцовом диапазоне частот, либо беспроводных соединений, работающих в видимом спектре, либо проводных соединений с применением оптического кабеля.

## **II Исследовательские задачи для терагерцовых сетей связи**

Помимо описанных выше преимуществ, беспроводные сети связи, работающие в терагерцовом диапазоне частот, обладают рядом особенностей, которые, в свою очередь, ведут к набору исследовательских задач, стоящих перед сообществом (см. рис. 2). Решение описанных ниже задач является критически важным для построения коммерческих терагерцовых сетей и поддержки перечисленных категорий приложений.

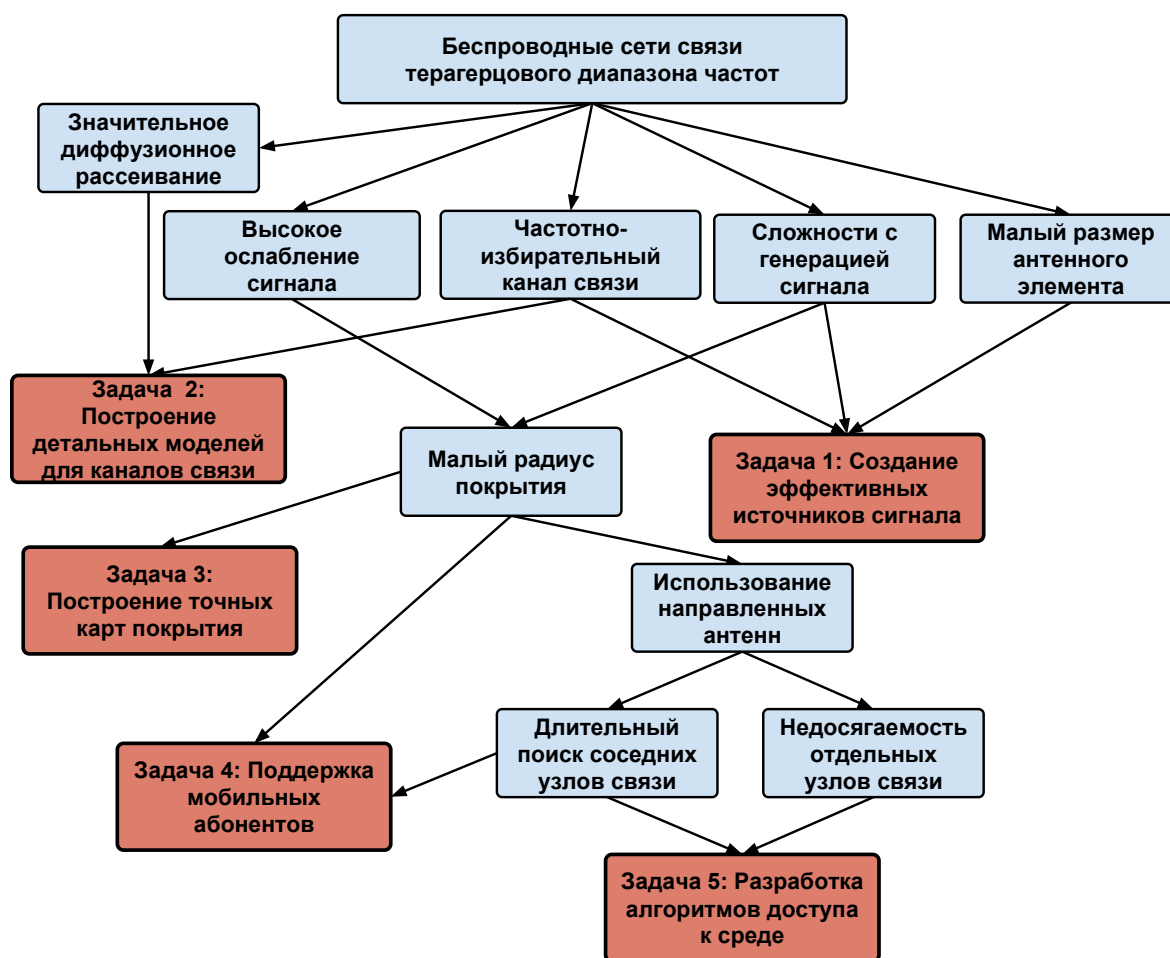


Рис. 2. Открытые исследовательские задачи для сетей связи терагерцового диапазона частот

## 1 Создание эффективных источников терагерцового сигнала

Одной из наиболее сложных проблем в построении систем связи, работающих в терагерцовом диапазоне частот, является создание эффективного и достаточно мощного генератора терагерцового сигнала. Основная трудность в том, что терагерцовые частоты слишком высоки, чтобы использовать генератор сигнала на основе осцилляции, и, в то же время, слишком низки для того, чтобы использовать генератор сигнала на основе потока фотонов [14]. Этот феномен известен в англоязычной литературе как "THz gap". Как следствие, большинство существующих генераторов сначала создает опорный сигнал одним из упомянутых способов, а затем увеличивает/уменьшает его частоты посредством преобразований. Подобный подход ведет к появлению дополнительных модулей между источником питания и антенной, что негативно сказывается на сложности, стоимости, энергоэффективности и выходную мощность передатчика.

В то же время, последние исследования и разработки в данной области (например, [15, 16]) позволяют сделать вывод, что THz gap если и не будет полностью закрыт в обозримой перспективе, то, как минимум, перестанет являться определяющим ограничением при построении терагерцовых сетей связи.



## **2 Построение детальных моделей для каналов связи**

Множество разнородных эффектов должно быть учтено при построении детальной модели терагерцового канала связи. Во-первых, существенное влияние частотно-зависимого эффекта молекулярной абсорбции приводит к желанию использовать так называемые «окна прозрачности» – частотные диапазоны внутри терагерцового спектра, в которых влияние эффекта молекулярной абсорбции минимально. Однако, даже в «окнах прозрачности» влияние молекулярной абсорбции на распространение сигнала ненулевое. В связи с этим, при рассмотрении даже простейших моделей распространения (например, «Free Space Path Loss») применительно к терагерцовым частотам, требуется добавление еще одного компонента (экспоненциально зависящего от дистанции между передатчиком и приемником) в уравнение [17, 18, 19]. Далее, так как существенная часть рассматриваемых сценариев использования терагерцовых сетей связи предполагает связь внутри помещений, все сложные эффекты распространения терагерцового сигнала внутри зданий (такие как отражения сигнала от стен и других объектов, ослабление сигнала при прохождении сквозь объекты и много другое) должны быть учтены. В связи со сложностью данной задачи, на сегодняшний день известны лишь несколько аналитических моделей распространения терагерцового сигнала внутри зданий [20, 21]. Наконец, обладая длиной волны в доли миллиметра, терагерцовый сигнал рассеивается при контакте практически с любым твердым предметом, как внутри помещения, так и за его пределами [22]. Наконец, использование направленных антенн требует существенно более сложного подхода к анализу интерференции в канале, как вызванной многолучевым распространением полезного сигнала, так и влиянием соседних точек доступа/абонентов [3, 23].

В результате, существует два основных подхода к построению моделей каналов для терагерцовых сетей связи. Первый подход предполагает детальное моделирование пространства вокруг приемника и передатчика с целью построения всех возможных (или наиболее вероятных) траекторий распространения сигнала. Данный подход, при правильном применении, позволяет получать результаты с высокой точностью, однако является вычислительно сложным и не может быть использован для построения широко применимых моделей, так как малейшее изменение сценария приводит к необходимости моделировать распространение сигнала еще раз. Второй подход основан на «усреднении» множества результатов, полученных первым подходом, с целью построения стохастической модели канала, применимой для широкого набора сценариев, пусть и в ущерб точности результатов, выдаваемых моделью в каждом конкретном сценарии.

## **3 Построение точных карт покрытия**

Подход к построению карт покрытия терагерцовой точки доступа принципиально повторяет подход, используемый для миллиметровых частот. Одним из основных элементов данной задачи является выявление ситуаций, при которых уровень ослабления сигнала между заданным передатчиком и заданным приемником является достаточно низким для организации надежного соединения.

В то же время, существенный уровень ослабления терагерцового сигнала при прохождении через большинство объектов [24] (даже при прохождении через тело человека) приводит к тому, что анализ требуется проводить для множества конфигураций взаимного расположения объектов в пространстве, что существенно осложняет построение карты покрытия.

#### **4 Поддержка мобильных абонентов**

Мобильность абонентов является одной из сложностей при построении сотовых или беспроводных локальных сетей связи. По причине мобильности абонентов и конечного радиуса покрытия сот требуется прописывать процедуры переключения абонента между точками доступа. Применительно к терагерцовым частотам, данная задача становится еще сложнее, так как даже небольшое изменение положения абонента влияет на качество соединения и требует подстройки направления лучей на обеих сторонах. Более того, в отличие от монотонного движения в сторону границы сантиметрового соты (например, пешком или на машине), небольшие изменения положения тела абонента (шаги, повороты, наклоны) являются гораздо менее прогнозируемыми. Так как система связи не может заранее спрогнозировать изменение положения абонента, она должна уметь действовать при практически любых изменениях. Наконец, время реакции на подобные события также ограничено, поскольку большая скорость передачи данных в терагерцовых сетях ведет к потерям существенных объемов данных при обрыве соединения.

#### **5 Разработка алгоритмов доступа к среде**

В завершении данной секции нельзя не отметить одну из наиболее сложных проблем при разработке терагерцовых сетей связи, а именно создание эффективных алгоритмов множественного доступа. Большинство существующих беспроводных сетей оперируют с антеннами слабой направленности, что позволяет передавать сигнальные сообщения сразу большому числу соседей. Терагерцовые сети связи, напротив, характеризуются очень узкими лучами диаграмм направленности, что приводит к сложностям при поиске и поддержке стабильного соединения до соседей, особенно, если выбранные узлы пока еще не общались друг с другом и ничего не знают о взаимном расположении. В этих условиях едва ли не единственным апробированным решением является полный перебор всех возможных конфигураций диаграммы направленности поочередно на каждом из узлов (по аналогии с IEEE 802.11ad). Однако, затраты на проведение данной процедуры близки к неприемлемым уже для IEEE 802.11ad, работающем на частоте в 60 ГГц. При попытке применения указанного подхода для терагерцовых сетей связи, сигнальные сообщения начинают доминировать в канале, что ведет к существенному снижению пропускной способности соединения и сети в целом. Для эффективной работы терагерцовой сети связи требуется создание более продвинутых алгоритмов и протоколов установления и поддержания соединения, а также организации множественного доступа в канал связи.

## Заключение

Терагерцовые сети связи имеют ряд существенных преимуществ в сравнении с сантиметровыми и миллиметровыми сетями, в основном, вызванными большей шириной полосы пропускания канала. Как проиллюстрировано в данной работе, подобные преимущества позволяют терагерцовым сетям более эффективно поддерживать некоторые категории приложений, в то время как отдельные приложения и сценарии использования становятся возможными только при использовании беспроводных сетей, работающих в терагерцовом диапазоне частот. Однако, в то же время, построение и анализ терагерцовых сетей связи требует решение множества исследовательских и инженерных задач, часть из которых также описана в данной работе. В таблице приведены зависимости между конкретными категориями приложений и открытыми исследовательскими задачами.

Таблица.  
Связь между приложениями и исследовательскими задачами

	Задача 1: Источник сигнала	Задача 2: Модели каналов связи	Задача 3: Карты покрытия	Задача 4: Поддержка мобильных абонентов	Задача 5: Алгоритм доступа к среде
Приложение 1: Информационный душ	+	+			+
Приложение 2: Мобильный доступ	+	+	+	+	+
Приложение 3: Высокозащищенные сети	+	+	+		
Приложение 4: Микро- и нано-связь	+	+	+		+
Приложение 5: Сети и системы на кристалле	+	+			+
Приложение 6: «Оптические» беспроводные сети	+	+			

Подводя итог, следует заметить, что ни одна из описанных выше исследовательских задач не является фундаментально неразрешимой, а, значит, с учетом существенных преимуществ терагерцового диапазона частот, следует ожидать появление терагерцовых сетей как неотъемлемого элемента систем связи одного из следующих поколений.

## Литература

1. Lopez-Perez D., Ding M., Claussen H., Jafari A. H. Towards 1 Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2015. Vol. 17. Iss. 4. pp. 2078–2101.
2. Jornet J. M. Fundamentals of Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band. – PhD Thesis. Georgia Institute of Technology. 2013.

3. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2016. pp. 1–7.
4. Petrov V., Pyattaev A., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Terahertz Band Communications: Applications, Research Challenges, and Standardization Activities // 8<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2016. pp. 183–190.
5. Peng B., Rey S., Kurner T. Channel Characteristics Study for Future Indoor Millimeter and Submillimeter Wireless Communications // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016. pp. 1–5.
6. Priebe S., Kannicht M., Jacob M., Kurner T. Ultra Broadband Indoor Channel Measurements and Calibrated Ray Tracing Propagation Modeling at THz Frequencies // Journal of Communications and Networks. 2013. Vol. 15. pp. 547–558.
7. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Applicability Assessment of Terahertz Information Showers for Next-Generation Wireless Networks // IEEE International Conference on Communications (ICC). 2016. pp. 1–7.
8. Akyildiz I. F., Jornet J. M., Han C. TeraNets: Ultra-Broadband Communication Networks in the Terahertz Band // IEEE Wireless Communications. 2014. Vol. 21. Iss. 4. pp. 130–135.
9. Akyildiz I. F., Jornet J. M., Han C. Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications // Physical Communication. 2014. Vol. 12. pp. 16–32.
10. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing Ultra-Massive MIMO Communication in the (0.06–10) Terahertz Band // Nano Communication Networks. 2016. Vol. 8. pp. 46–54.
11. Moltchanov D. et al. Statistical Traffic Properties and Model Inference for Shared Cache Interface in Multi-Core CPUs // IEEE Access. 2016. Vol. 4. pp. 4829–4839.
12. Petrov V. et al. Terahertz Band Intra-Chip Communications: Can Wireless Links Scale Modern x86 CPUs? // IEEE Access. 2017. Vol. PP. Iss. 99. pp. 1–1.
13. Petrov V., Kokkonen J., Moltchanov D., Lehtomäki J., Koucheryavy Y. Enabling Simultaneous Cooling and Data Transmission in the Terahertz Band for Board-to-Board Communications // Physical Communication. 2017. Vol. 22. pp. 9–18.
14. Майская В. Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 8. С. 74–87.
15. Kallfass I., Boes F., Messinger T., Antes J., Inam A., Lewark U., Tessmann A., Henneberger R. 64 Gbit/s Transmission over 850m Fixed Wireless Link at 240 GHz Carrier Frequency // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2015. Vol. 36. Iss. 2. pp. 221–233.
16. Hirata A., Kosugi T., Takahashi H., Yamaguchi R., Nakajima F., Furuta T., Ito H., Sugahara H., Sato Y., Nagatsuma T. 120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54. Iss. 5. pp. 1937–1944.
17. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Dense Terahertz Networks // 82<sup>nd</sup> IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2015. pp. 1–5.
18. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2011. Vol. 10. pp. 3211–3221.
19. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. On the Efficiency of Spatial Channel Reuse in Ultra-Dense THz Networks // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2015. pp. 1–7.
20. Priebe S., Kurner T. Stochastic Modeling of THz Indoor Radio Channels // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2013. Vol. 12. pp. 4445–4455.
21. Han C., Bicen A.O., Akyildiz I.F. Multi-Ray Channel Modeling and Wideband Characterization for Wireless Communications in the Terahertz Band // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2015. Vol. 14. pp. 2402–2412.
22. Kokkonen J., Petrov V., Moltchanov D., Lehtomäki J., Koucheryavy Y., Juntti M. Wideband Terahertz Band Reflection and Diffuse Scattering Measurements for Beyond 5G Indoor Wireless Networks // 22th European Wireless Conference. 2016. pp. 1–6.
23. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 3. pp. 1791–1808.
24. Kokkonen J., Lehtomäki J., Petrov V., Moltchanov D., Juntti M. Frequency Domain Penetration Loss in the Terahertz Band // Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) ESA Workshop on Millimeter-Wave Technology and Applications. 2016. pp. 1–4.

## References

1. Lopez-Perez, D., Ding, M., Claussen, H., Jafari, A. H. Towards 1 Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments // *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2015. Vol. 17. Iss. 4. pp. 2078–2101.
2. Jornet, J. M. Fundamentals of Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band. – PhD Thesis. Georgia Institute of Technology. 2013.
3. Petrov, V., Komarov, M., Moltchanov, D., Jornet, J. M., Koucheryavy, Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2016. pp. 1–7.
4. Petrov, V., Pyattaev, A., Moltchanov, D., Koucheryavy, Y. Terahertz Band Communications: Applications, Research Challenges, and Standardization Activities // *8<sup>th</sup> International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. 2016. pp. 183–190.
5. Peng, B., Rey, S., Kurner, T. Channel Characteristics Study for Future Indoor Millimeter and Submillimeter Wireless Communications // *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2016. pp. 1–5.
6. Priebe, S., Kannicht, M., Jacob, M., Kurner, T. Ultra Broadband Indoor Channel Measurements and Calibrated Ray Tracing Propagation Modeling at THz Frequencies // *Journal of Communications and Networks*. 2013. Vol. 15. pp. 547–558.
7. Petrov, V., Moltchanov, D., Koucheryavy, Y. Applicability Assessment of Terahertz Information Showers for Next-Generation Wireless Networks // *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2016. pp. 1–7.
8. Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., Han, C. TeraNets: Ultra-Broadband Communication Networks in the Terahertz Band // *IEEE Wireless Communications*. 2014. Vol. 21. Iss. 4. pp. 130–135.
9. Akyildiz, I. F., Jornet, J. M., Han, C. Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications // *Physical Communication*. 2014. Vol. 12. pp. 16–32.
10. Akyildiz, I.F., Jornet, J.M. Realizing Ultra-Massive MIMO Communication in the (0.06–10) Terahertz Band // *Nano Communication Networks*. 2016. Vol. 8. pp. 46–54.
11. Moltchanov, D. et al. Statistical Traffic Properties and Model Inference for Shared Cache Interface in Multi-Core CPUs // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. pp. 4829–4839.
12. Petrov, V. et al. Terahertz Band Intra-Chip Communications: Can Wireless Links Scale Modern x86 CPUs? // *IEEE Access*. 2017. Vol. PP. Iss. 99. pp. 1–1.
13. Petrov, V., Kokkonieni, J., Moltchanov, D., Lehtomäki, J., Koucheryavy, Y. Enabling Simultaneous Cooling and Data Transmission in the Terahertz Band for Board-to-Board Communications // *Physical Communication*. 2017. Vol. 22. pp. 9–18.
14. Maiskaya, V. Development of the Terahertz Gap. Semiconductors Invade the Submillimeter Range // *Electronica: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2011. No. 8. pp. 74–87.
15. Kallfass, I., Boes, F., Messinger, T., Antes, J., Inam, A., Lewark, U., Tessmann, A., Henneberger, R. 64 Gbit/s Transmission over 850m Fixed Wireless Link at 240 GHz Carrier Frequency // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. Vol. 36. Iss. 2. pp. 221–233.
16. Hirata, A., Kosugi, T., Takahashi, H., Yamaguchi, R., Nakajima, F., Furuta, T., Ito, H., Sugahara, H., Sato, Y., Nagatsuma, T. 120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006. Vol. 54. Iss. 5. pp. 1937–1944.
17. Petrov, V., Moltchanov, D., Koucheryavy, Y. Interference and SINR in Dense Terahertz Networks // *82<sup>nd</sup> IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. 2015. pp. 1–5.
18. Jornet, J. M., Akyildiz, I. F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10. pp. 3211–3221.
19. Petrov, V., Moltchanov, D., Koucheryavy, Y. On the Efficiency of Spatial Channel Reuse in Ultra-Dense THz Networks // *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2015. pp. 1–7.
20. Priebe, S., Kurner, T. Stochastic Modeling of THz Indoor Radio Channels // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2013. Vol. 12. pp. 4445–4455.
21. Han, C., Bicen, A.O., Akyildiz, I.F. Multi-Ray Channel Modeling and Wideband Characterization for Wireless Communications in the Terahertz Band // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2015. Vol. 14. pp. 2402–2412.

22. Kokkoniemi, J., Petrov, V., Moltchanov, D., Lehtomäki, J., Koucheryavy, Y., Juntti, M. Wideband Terahertz Band Reflection and Diffuse Scattering Measurements for Beyond 5G Indoor Wireless Networks // 22th European Wireless Conference. 2016. pp. 1–6.

23. Petrov, V., Komarov, M., Moltchanov, D., Jornet, J.M., Koucheryavy, Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 3. pp. 1791–1808.

24. Kokkoniemi, J., Lehtomäki, J., Petrov, V., Moltchanov, D., Juntti, M. Frequency Domain Penetration Loss in the Terahertz Band // Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) ESA Workshop on Millimeter-Wave Technology and Applications. 2016. pp. 1–4.

- Кучерявый Евгений Андреевич*** – кандидат технических наук, профессор, НИУ ВШЭ, Москва, 101000, Российская Федерация, yevgeni.koucheryavy@gmail.com
- Молчанов Дмитрий Александрович*** – кандидат технических наук, доцент, РУДН, Москва, 117198, Российская Федерация, moltchanov.dmitri@gmail.com
- Петров Виталий Игоревич*** – аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, vit.petrov@gmail.com
- Koucheryavy Yevgeni*** – Ph.D., Professor, NRU HSE, Moscow, 101000, Russian Federation, yevgeni.koucheryavy@gmail.com
- Moltchanov Dmitri*** – Ph.D., Associate Professor, RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation, moltchanov.dmitri@gmail.com
- Petrov Vitaly*** – postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, vit.petrov@gmail.com